

**SIDEANTURIEN KÄYTTÖ MÄKIHYYPYN PONNISTUSVOIMIEN  
MITTAAMISESSA**

Jyri Pelkonen

Biomekaniikan pro gradu -  
tutkielma

Kevät 2000

Liikuntabiologian laitos

Jyväskylän Yliopisto

# SISÄLLYS

<b>Tiivistelmä</b>	2
<b>1 JOHDANTO</b>	5
<b>2 KIRJALLISUUSKATSAUS</b>	6
<b>2.1 Reaktiivoimien mittaamisesta liikkumisen yhteydessä</b>	6
<b>2.2 Mittausmenetelmien kehittyminen mäkihypyssä</b>	7
<b>2.3 Tutkimuksen tarkoitus ja tavoitteet</b>	8
<b>3 TUTKIMUSMENETELMÄT</b>	9
<b>3.1 Yleiskuvaus ja koehenkilöt</b>	9
<b>3.2 Mittausasetelma</b>	9
<b>3.3 Voimamittaukset</b>	12
<b>3.4 Lihasaktiivisuuksien mittaus</b>	13
<b>3.5 Signaalien käsittely</b>	13
<b>3.6 Suoritusten kuvaus liikeanalyysillä</b>	14
<b>3.7 Menetelmälliset ongelmat</b>	15
<b>3.8 Tilastollinen käsittely</b>	15
<b>4 TUTKIMUSTULOKSET</b>	16
<b>4.1 Voimien jakautuminen päkiän ja kannan kesken</b>	16
4.1.1 Vertikaalivoimat (Fz)	16
4.1.2 Horisontaalivoimat (Fy)	18
<b>4.2 Päkiävoimien jakautuminen oikean ja vasemman jalan kesken</b>	19
4.2.1 Vertikaalivoimat (Fz)	19

	4
4.2.2 Horisontaalivoimat (Fy)	19
<b>4.3 Liikeanalyysit suorituksista</b>	22
<b>4.4 Lihasaktiivisuudet</b>	26
<b>5 POHDINTA</b>	30
<b>Lähdeluettelo</b>	34
<b>Kuvaliite</b>	36

## Tiivistelmä

Pelkonen, Jyri. Sideanturien käyttö mäkihypyn ponnistusvoimien mittaamisessa Biomekaniikan pro gradu -tutkielma. Liikuntabiologian laitos. JYVÄSKYLÄN yliopisto, 2000. s. 36.

Sideanturien käyttö mäkihypyn ponnistusvoimien mittaamisessa -tutkielman tavoitteena oli selvittää vertikaalisten ja horisontaalisten voimien käyttäytymistä mäkihypyn ponnistuksessa kahdella kansallisen tason hyppääjällä ja kuvailla ponnistustapahtumaa reaktiivoimien, lihasaktiivisuuksien ja liikeanalyysin perusteella. Tutkimusmenetelminä käytettiin erikseen valmistettuja mäkisiteitä, joissa oli vastusvenymäliuska-anturit mittaamassa sekä vertikaalisia, että horisontaalisia voimia. Kahdella erilaisella voima-asetelmalla selvitettiin voimien käyttäytymistä päkiän ja kannan kesken. Tämän lisäksi suoritukset (30 kpl) kuvattiin High Speed videokameralla liikeanalyysiä varten ja mitattiin suorituksen aikaiset lihasaktiivisuudet tärkeimmistä ponnistuslihaksista (m. Vastus lateralis, m. Tibialis, m. Gastrocnemius, m. Gluteus). Tutkielmassa havaittiin vertikaali- ja horisontaalivoimien vaiheittaiset käyttäytymiset ponnistuksessa. Tärkeimmät tutkimustulokset osoittivat horisontaalisten voimien käyttäytymisen riippuvan ponnistustekniikasta ja oikein tuotettuna mahdollistavan suuremman horisontaalisen nopeuden saavuttamisen hyppyrinpöydällä. Lisäksi menetelmä osoittautui käyttökelpoiseksi ponnistuksen symmetrisyyden arvioinnissa.

Avainsanat: mäkihyppy, vertikaali- ja horisontaalivoimat, vastusvenymäliuska-anturit

## 1 JOHDANTO

Alustaan kohdistuvia reaktivoimia voidaan tutkia voimalevyantureilla, jotka mittaavat voimat kolmeen suuntaan ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Nämä voimalevyt, jotka mäkihypyn ponnistustapahtuman tutkimuksissa on asennettu hyppyrinpöydälle, vauhtimäen ladun alle, ovat olleet tutkijoiden käytössä tässä tarkoituksessa jo 1970-luvulta lähtien. Pääpaino koko 1970-luvun lopun ja 1980-luvun ajan oli vertikaalisten, kohtisuoraan latua vastaan suuntautuvien voimakomponenttien selvittämisessä, eivätkä käytetyt menetelmät eri syistä edes mahdollistaneet horisontaalisten, hyppyrinpöydän suuntaisten voimien mittausta. Mittausmenetelmien kehittyessä ja lajitietämyksen lisääntyä mielenkiinnon kohteeksi on noussut juuri ponnistusvaiheen horisontaaliset voimat, mikä tässä tutkimuksessa oli yksi pääteemoista. Aiemmin tehdyistä tutkimuksista ainoastaan norjalaisten (Tveit & Pedersen (1981)) tekemä tutkimus pyrki pureutumaan tähän teemaan, joten tätäkin taustaa vasten horisontaalisten voimien käyttäytymisen selvittäminen on yksi uusi haaste mäkihypyn tutkijoille.

Mäkihyppysuorituksen eri vaiheet (ylämäen lasku, ponnistus, ilmalento ja alastuloon valmistautuminen) vaikuttavat kaikki suorituksen merkittävimpään kriteeriin l. hypyn pituuteen. Näistä vaiheista ratkaisevimpana pidetään ponnistusta, sillä se määrää lentoonlähtökulman, irtoamisnopeuden, kiertomomentin aikaansaamisen ja hyppääjä / sukset -systemin asennon ilmalennon aikana. Hermo-lihasjärjestelmälle mäkihypyn ponnistus asettaa kovia vaatimuksia suuren lähestymisnopeuden sekä ponnistukseen käytettävissä olevan ajan (0,25-0,35 s) rajallisuuden takia. Hyppääjän taitavuus ratkaisee, kuinka hän onnistuu tämän lyhytkestoisen, räjähtävän ponnistuksen toteuttamisessa. (Komi & Virmavirta 1997)

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli testata mäkisuuksisiteisissä olevien vastusvenymälihuska-antureiden toimivuutta vertikaalisten ja horisontaalisten voimien mittaamiseen ponnistuksen aikana ja kuvailla ponnistustapahtumaa tämän menetelmän, lihasaktiivisuusmittausten sekä liikeanalyysin pohjalta.

## 2 KIRJALLISUUSKATSAUS

### 2.1 Reaktivoimien mittaamisesta liikkumisen yhteydessä

Erilaisten liikkumismuotojen aikana maahan kohdistuvia voimia mitataan yleisimmin voimalevyillä, joiden mittaustekniikka perustuu vastusvenymäliuska-antureiden toimintaan (Nigg & Herzog, 1999). Voimalevyjen avulla voidaan mitata maan reaktivoimia kolmeen suuntaan ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) ja voimalevystä riippuen on mahdollista laskea esimerkiksi askeleen painekeskusteitä. Toimintaperiaatteina näissä voimalevyantureissa ovat sähköiset vastusvenymäliuska-anturit, pietsoresistiiviset anturit, kondensaattorit, induktiiviset menetelmät tai valoelektrisyys.

Sähköinen kondensaattori perustuu kahden samansuuntaiseen, sähköä johtavaan levyyn ja niiden väliseen rakoon sekä kapasitanssin muutokseen jonkin ulkopuolisen voiman puristaessa kyseisiä levyjä lähemmäksi toisiaan. Johtuvuuteen perustuvat sensorit (konduktorit) ovat rakenteeltaan lähes samanlaisia kuin kondensaattorit, mutta näissä levyjen välinen materiaali on sähköä johtava. Ulkopuolisen voiman puristaessa levyjä lähemmäksi toisiaan levyjen välinen sähköinen vastus muuttuu ja tuotettu voima voidaan mitata sähkövirran muutoksen avulla. Pietsoelektrinen mittaustapa perustuu taasen ulkopuolisen voiman aikaansaamaan varauksen muutokseen pietsoelektrisissä materiaaleissa kuten kvartsissa. Pietsoelektristen menetelmien etuna on niiden erittäin laajat käyttömahdollisuudet sekä hyvä mittaustarkkuus. (Nigg & Herzog, 1999)

## 2.2 Mittausmenetelmien kehittyminen mäkihypyssä

Mäkihypyn ponnistusvaiheen voimantuoton mittaukset aloitettiin 1950-luvun loppupuolella Gerhard Hochmuthin toimesta (Hochmuth 1958). Hän esitti simuloituissa olosuhteissa tekemiensä ponnistusvoimamittausten perusteella, että tehokas ponnistusliike on välttämätön, jotta hyppääjä saavuttaa korkean lentoradan lentovaiheen alussa. Hänen työnsä inspiroimana mäkihypyn ponnistusvoimia alettiin mitata myös oikeissa olosuhteissa ja sittemmin näitä on tehty usean tutkijan toimesta. Vuonna 1975 Sobotka & Kastner (1977) tekivät ensimmäisen yrityksen mitata hyppääjän tuottamia ponnistusvoimia lajisuorituksessa käyttäen lumen alle asetettuja voimalevyjä. Lumiolosuhteiden muutokset ja lumen ”tamppaus” tiiviiksi hankaloitti voimalevyjen mittauskykyä, mutta saaduista tuloksista tutkijat tulivat siihen johtopäätökseen, että ponnistusvaiheen loppu korreloi hypyn pituuteen. Troxler & Rùegg (1979) kehittivät systeemin, joka mittasi hypyrinpöydältä, viimeisten 6 m:n matkalta kohtisuorat reaktivoimat. Heidän tutkimuksensa osoittivat, että tietyt voima-, impulssi- ja aikaparametrit olivat yhteydessä hyvään hyppyyn. Varsinkin hyvillä hyppääjillä korrelaatiot hypyn pituuden ja eri voimamuuttujien välillä olivat selkeät.

Norjalaiset Tveit & Pedersen (1981) käyttivät ponnistusvoimien mittaamiseen toisen suksen siteen päkiä- ja kantakappaleeseen kiinnitettyjä voima-antureita. Tutkijat vertasivat simuloitussa mäkiponnistuksessa mitattuja voimia todellisissa olosuhteissa, 70 m mäessä saatuihin voimiin. Koska mäessä totaalivoimat olivat paljon pienemmät kuin simuloituissa ponnistuksissa, Tveit & Pedersen tulivat siihen johtopäätökseen, että ponnistuksen vertikaaliseen kiihtyvyyteen oli kiinnitetty liikaa huomiota ja hyppääjän tulisi pyrkiä vain säilyttämään horisontaalinen nopeutensa.

Virmavirta ja Komi (1989) mittasivat Calgaryn talviolympialaisissa kaikkien hyppääjien ponnistukset ladun alla olevalla voimalevyjärjestelmällä, joka koostui neljästä levystä, jotka olivat 2 m pitkiä ja 1 m leveitä. Pakkautunut lumi aiheutti ongelmia systeemin toimivuudelle ja tutkijat joutuivat käyttämään erillistä korjausohjelmaa muokataksaan alkuperäistä signaalia kilpailua edeltävän ja kilpailun jälkeen tehtyjen kalibrointi-

en perusteella. Tässä tutkimuksessa suuri suhteellinen voimantuotto ponnistuksessa ja hypyn pituus korreloivat vain heikosti.

Esille tulleet talvisista olosuhteista aiheutuneet ongelmat saivat aikaan sen, että kehitettiin muovimäkiin soveltuvaa voimamittausjärjestelmää. Vaverka (1987) mittasi vuodesta 1977 alkaen ponnistusvoimia kilpailutilanteissa Frenstatin (Cze) K90 m muovimäestä, ja onnistui keräämään aineistoa kaiken kaikkiaan yli 2500 ponnistuksesta. Virmavirta & Komi (1993) tekivät useita mittauksia muovimäessä jäälatuelementtien alle asennetuilla voimalevyillä 1980-luvun lopulla ja 1990-luvun alussa. Järjestelmä mahdollisti reaktivoimien mittauksen sekä vertikaaliseen, että horisontaaliseen suuntaan. Kuitenkin jäälatuelementtien lämpölaajeneminen aikaansai ylimääräistä jännitettä mittaessa horisontaalisia, hyppyripöydän suuntaisia voimia. Tämän vuoksi näiden voimien kalibrointi osoittautui hankalaksi, eikä em. tutkimuksissa pyrittykään analysoimaan näitä voimia.

Sittemmin voimia on mitattu epäsuorasti painejakauman avulla; Itävaltalaiset Schwameder & Müller (1995) käyttivät tutkimuksessaan erillisiä painepohjallisia, jotka käsittivät kaikkiaan 85 sensoria (Mikro Emed). Virmavirta ym (painossa) ja Virmavirta & Komi (2000) demonstroivat painepohjallisten käyttömahdollisuuksista Paromed – Datalogger ® -järjestelmän yhteydessä. Heidän tuloksensa osoittivat kantapään ja päkiän paineiden lisääntyvän ponnistuksen keskivaiheessa hyppyrinpöydällä, jossa kaarteella vaikuttava keskipakovoima ( $= mv^2/r$ ;  $r$  = kaarteen säde,  $v$  = lähestymisnopeus,  $m$  = hyppääjän massa) ei enää kohdistu hyppääjään.

### 2.3 Tutkimuksen tarkoitus ja tavoitteet

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli testata mäkisiteiden päkiä- ja kantakappaleissa olevien vastusvenymäliuska-antureiden soveltuvuutta ponnistusvoimien mittaamiseen ja saada yksi uusi näkökulma ponnistustekniikan kuvailemiseen. Erityisenä mielenkiinnon kohteena oli horisontaaliset, hyppyripöydän suuntaiset voimakomponentit ja voimien jakautuminen kantapään / päkiä kesken ponnistuksen eri vaiheissa.



## **3 TUTKIMUSMENETELMÄT**

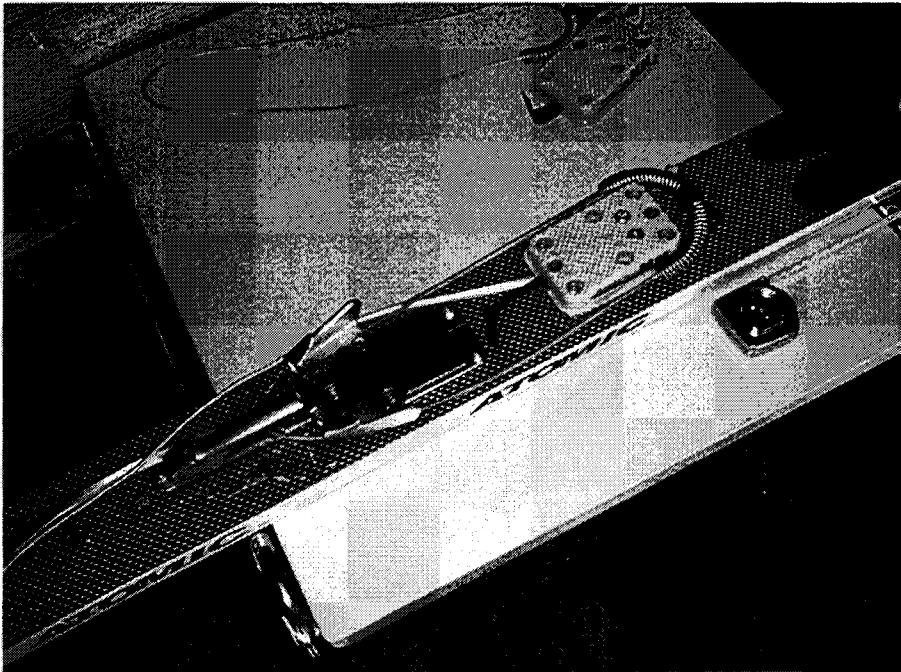
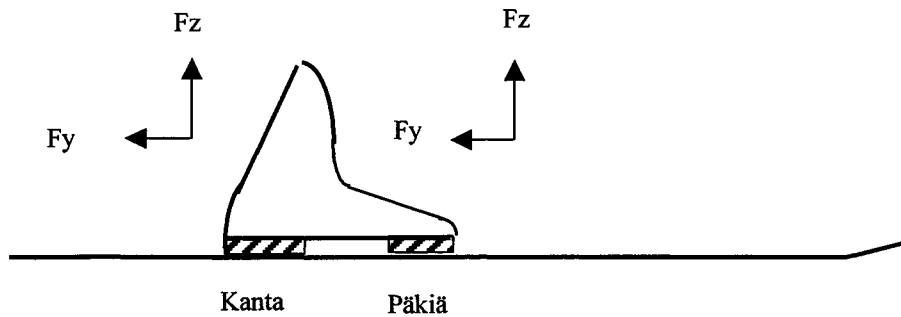
### **3.1 Yleiskuvaus ja koehenkilöt**

Tutkimus toteutettiin kevättalvella 2000 Jyväskylän K65 m mäessä (kuvaliite). Liikuntabiologian laitoksella valmistetut mäkisiteet, joissa oli vastusvenymäliuska-periaatteella toimivat, sekä vertikaalisia, että horisontaalisia voimia mittaavat anturit, kiinnitettiin koehenkilöiden omiin suksiin mittausten ajaksi (kuva 1). Koehenkilöinä toimi kaksi B-maajoukkue-tason mäkihyppääjää (ikä 20 & 25 v, paino 56 & 66 kg, pituus 173 & 184 cm), jotka suorittivat kaksi erillistä hyppyharjoitusta saman päivän aikana. Kukin asetelma käsitti seitsemän tai kahdeksan hyppyä. Olosuhteet mittauspäivinä olivat erinomaiset; lämpötila -5°C, kevyttä vastatuulta (1-2 m/s) ja jäinen, liukas ylämäen latu.

### **3.2 Mittausasetelma**

Mäkisiteiden voimanmittaus on kuvattuna kuvassa 1. Siteet kiinnitettiin täsmälleen samoihin paikkoihin kuin ”normaalitkin” siteet. Ne olivat aavistuksen verran korkeammat ja hieman painavammat kuin hyppääjien omat siteet, mutta mahdollistivat täysipainoisen hyppäämisen, eikä näihin totuttelu vienyt koehenkilöiltä kuin pari hyppykierrosta. Tuloksia analysoitaessa molemmilta koehenkilöiltä nämä ”koehypyt”

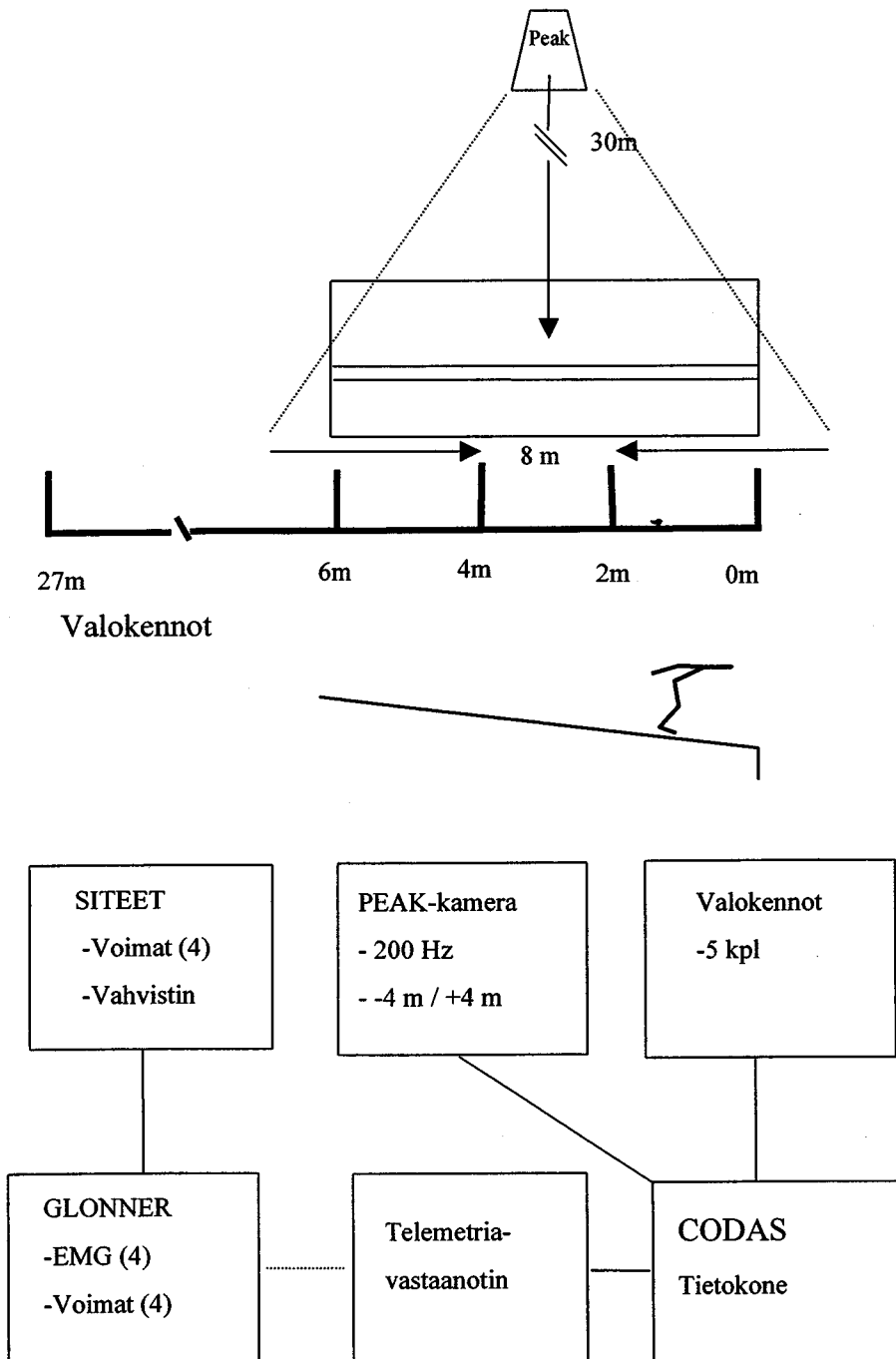
ensimmäisestä asetelmasta jätettiin huomioimatta, joten kaikkiaan analysoitiin 28 suoritusta.



Kuva 1. Ponnistusvoimien voima-anturien mittaussuunnat (yllä) ja tutkimuksessa käytetty mäkiside (alla).

Käytetty mittausasetelma on havainnollistettuna kuvassa 2. Hyppääjän selkään mäkipuvun alle kiinnitettiin vyöllä voimavahvistin sekä 16-kanavainen telemetrialaitteisto (Glonner) EMG:tä ja voimia varten. Yhdessä nämä painoivat alle 1,0 kg eivätkä haitanneet hyppysuoritusta. Glonnerista tieto lähetettiin telemetrisesti tietokoneelle. High speed videokamera (Peak Performance) asetettiin 30 m päähän latu-urasta siten, että kuvaussektori käsitti yhteensä kahdeksan (8) metrin alueen hyppyrinpyödyllä. Ylämäen suoranosan päättymiskohtaan (27 m hyppyriltä) ja kaartein loppumiskohtaan 6 m

kohdalle, sekä 4 m ja 2 m etäisyydelle hyppyrin kärjestä ja hyppyrin katkeamiskohtaan asetettiin valokennot, joista saatiin merkki tietokoneelle.



Kuva 2 Tutkimuksessa käytetty mittausasetelma.

### 3.3 Voimamittaukset

**Mittaus 1.** Sekä vertikaaliset ( $F_z$ ), että horisontaaliset ( $F_y$ ) voimat mitattiin **oikean jalan päkiä- ja kantaosasta**, kanta ( $F_z, F_y$ ), päkiä ( $F_z, F_y$ ) (ks. kuva 1). Kumpikin koehenkilö teki seitsemän tai kahdeksan suoritusta, jonka jälkeen antureiden 0-tasot tarkastettiin.

**Mittaus 2.** Sekä vertikaaliset ( $F_z$ ), että horisontaaliset ( $F_y$ ) voimat mitattiin **molempien jalkojen päkiäosasta**. Oikea jalka, päkiä ( $F_z$  ja  $F_y$ ), vasen jalka päkiä ( $F_z$  ja  $F_y$ ). Kumpikin koehenkilö suoritti seitsemän tai kahdeksan hyppyä, jonka jälkeen 0-tasot jälleen tarkastettiin.

Voimasignaalit kustakin mitattavasta anturista vahvistettiin 4 -kanavaisen vahvistimen avulla, ja kanavien 0-tasot säädettiin kuhunkin mittausasetelmaan erikseen. Ylämäen suoranosan jyrkkyys ( $33^\circ$ ), kaarteiden alkamis- ja päättymiskohdat, sekä hyppyrin pöydän kaltevuus ( $10^\circ$ ) määritettiin kulmamittarin avulla. Näitä kulmia käytettiin laskettaessa hyppääjän aikaansaamia, kohtisuoraan latua vasten kohdistuvia nettovoimia. Valokennot asetettiin kaarteiden alkuun (27 m hyppyrin kärjestä) sekä kaarteiden loppuun (6 m) sekä hyppyrin pöydälle (4, 2, 0 m) ilmaisemaan hyppääjän sijainnin ja lähestymisnopeuden. Hyppääjän selässään kantaman Glonner-boksin taltioimat ja telemetrisesti lähetetyt voimasignaalit (4 kpl / suoritus) sekä valokennosignaalit nauhoitettiin tietokoneelle.

Vertikaalisten nettovoimien laskemiseksi selvitettiin hyppääjien sekä mittalaitteiden (Glonner, voimavahvistin) ja mäkivarusteiden (mäkikengät, puku, kypärä) massa. Kustakin suorituksesta kunkin voimakanavan perustasoksi otettiin hyppääjän paino ylämäen suoralla osalla (200 ms pituisen jakson keskiarvo), johon ponnistuksen aikaisia voimia verrattiin.

### 3.4 Lihasaktiivisuuksien mittaaminen

Kustakin suorituksesta mitattiin lihasten sähköiset EMG-aktiivisuudet tärkeimmistä ponnistuslihaksista (m. Tibialis anterior, m. Gastrocnemius, m. Vastus lateralis ja m. Gluteus) käyttäen telemetristä EMG-yksikköä (Glonner) lihasaktiivisuuksien esille saamiseen, lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Mahdollisimman puhtaan EMG-signaalin saamiseksi tutkittavasta lihaksesta poistettiin ihokarvat ja kuollut ihokerros. Iho myös puhdistettiin alkoholilla ennen kuin kertakäyttöiset ECG-elektrodit (Ag/AgCl, 10 mm halkaisija ja 25 mm elektrodien välinen etäisyys, valmistaja Niko Surgical Ltd, Englanti) kiinnitettiin lihasten päälle pitkittäin lihasten suuntaisesti. Lisäksi lonkkaluuhun (Trochanter major) kiinnitettiin maaelektrodi. Telemetrisesti lähetetyt EMG-signaalit nauhoitettiin tietokoneelle koko suorituksen ajalta.

### 3.5 Signaalien käsittely

Kaikki analogisignaalit taltioitiin Cudas-tiedonkeruuohjelmalla ja siirrettiin edelleen FCodas -ohjelmaan jatkokäsittelyä (analysointia) varten. FCodasilta data siirrettiin MS Excel 5.0 -ohjelmaan, jossa eri suoritusten ponnistusvaiheet aikanosittettiin samantyyppisiksi. Analyysi keskittyi ponnistusvaiheeseen, ja se alkoi 50 ms ennen 6 m valokennon ja päättyi viimeisen valokennon kohdalle (0 m). Ponnistusvaihe keskiarvoistettiin 30 ms pätkiin, jotta voimien käyttäytyminen saatiin selvemmin esille. Alkuperäinen raakadata oli liian röpelöinen analysoitavaksi, johtuen 1000 Hz keräystaajuudesta, kovassa vauhdissa (21 m/s) tapahtuvasta suksen värinästä ja talvisen latu-uran mahdollisista epätasaisuuksista.

Molemmista asetelmista (mittaus 1 & 2) mitattiin vertikaaliset ja horisontaaliset voimat, joiden käyttäytymisen perusteella kummankin hyppääjän tekniikkaa kuvailtiin.

Lihaskäytävyyksien mittaamisessa käytettiin 800 Hz keräystaajuutta. EMG:t vahvistettiin 1000 kertaisesti ja suodatettiin käyttäen alarajana 5 Hz ja ylärajana 200 Hz. EMG:t tasasuunnattiin ja aikanormalisoitiin ponnistusvaiheen ajalta samanpituisiksi, jonka jälkeen suoritukset keskiarvoistettiin.

### 3.6 Suoritusten kuvaus liikeanalyysillä

Kaikkien hyppyjen ( $n = 30$ ) ponnistusvaihe kuvattiin käyttäen High Speed –video-kameraa (Peak Performance) kuvanopeudella 200 kuvaa/s . Kuvaus tapahtui kohtisuoraan hyppyrinpöydän sivulta, 30 m etäisyydeltä hyppääjän käyttämästä latu-urasta. Kamera asetettiin siten, että kuvaussektori kattoi 8 m alueen (ks. kuva 2), 1. hyppyrinpöytä  $\pm 1$  m. Kamera skaalattiin käyttäen 6 m ja 0 m valokennojen välistä horisontaalista etäisyyttä ( $6 \text{ m} \times \cos 10^\circ = 5,89 \text{ m}$ ). Perspektiivivirhe tällä asetelmalla laskettiin ja se oli vähemmän kuin 0,5 %. Kahden pisteen avulla kalibroitiin 2D -koordinaattiarvot. Voimien synkronisointiin kuvan kanssa käytettiin erillistä käsin annettua valomerkkiä.

Videofilmit digitoitiin käyttäen Motus -liikeanalyysiohjelmaa. Hyppääjän mekaanisen mallin luomiseksi oletettiin molemmat puolet symmetrisiksi ja käytettiin muokattua Demsterin (1967) kehon segmenttiparametriarviota. Tämä koostui kahdeksasta (8) pisteestä ja seitsemästä (7) kehon segmentistä (jalkaterä, sääri, reisi, vartalo, olkavarsi, käsivarsi / käsi ja pää). Pisteytyksen jälkeen digitoidut liikeradat tasoitettiin ohjelman sisältämän polynomi - sovitteen avulla.

### 3.7 Menetelmälliset ongelmat

Sideanturit kalibroitiin laboratorio-olosuhteissa käyttäen lineaarisia venytyksiä eri suuruisilla vapailla painoilla. Järjestelmän toimivuus mäkiolosuhteissa tarkistettiin jokaisen mittaussarjan jälkeen siten, että koehenkilö a) seiso paikallaan (vertikaalivoimat) ja b) teki taaksepäin, tukea vasten suuntautuvia työntöjä (horisontaalivoimat), suksien päällä tasaisella alustalla siteet kiinnitettyinä.

Hyppytilanne simuloitiin 50 kg:n painoisella elottomalla kappaleella, joka asennettiin erilliselle alustalle siteiden päälle tasaisesti molemmille suksille. Mittalaitteet sisältämä systeemi (yhteensä 55 kg) päästettiin liukumaan latua pitkin samalla asetelmalla (mittaus 1) ja lähestymisnopeudella kuin hyppääjätkin (n. 21 m/s). Järjestelmän tarkoituksena oli antaa informaatiota vertikaalisten ja horisontaalisten voimien käyttäytymisestä ylämäen kaarteella (27 m-6 m hyppyrin kärjestä) ja hyppyripöydällä elottomalla kappaleella, kun lihasvoima ei ole vastustamassa kaarteella vaikuttavaa keskipakovoimaa ( $= mv^2/r$ , jossa  $m$  = hyppääjän massa,  $v$  = lähestymisnopeus ja  $r$  = kaarten säde). Hyppääjällä MJI ( $m = 56$  kg) tämä keskipakovoima oli n. 440 N ja hyppääjällä JV ( $m = 66$  kg) n. 525 N. Kuitenkin mäen ladun epätasaisuuden ja mittauslaitteen mataluuden takia tämä kalibrointi epäonnistui, eikä ko. voimia pystytty mittaamaan.

### 3.8 Tilastollinen käsittely

Asetelman luonteesta johtuen varsinaiseen tilastolliseen käsittelyyn ei ollut aihetta. Tutkimuksessa oli mukana ainoastaan kaksi koehenkilö, jotka lisäksi suorittivat hyppynsä ( $n = 15$ ) kahdella eri mittausasetelmalla. Kummaltakin hyppääjältä keskiarvoistettiin lihasaktiivisuudet (aEMG), samoin kuin voimat (mittaus 1 & 2) ja kinemaattiset parametrit. Kuvailtaessa eri hyppääjien voimantuottoa ja ponnistustekniikkaa, molempien hyppääjien paras suoritus (= pisin hyppy toisessa asetelmassa) analysoitiin erikseen.

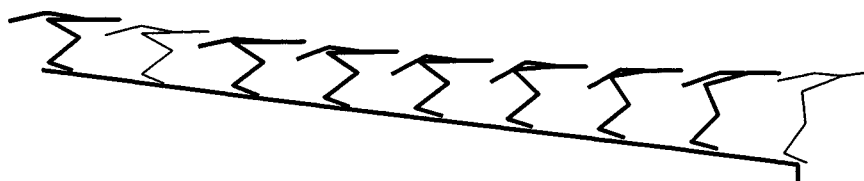
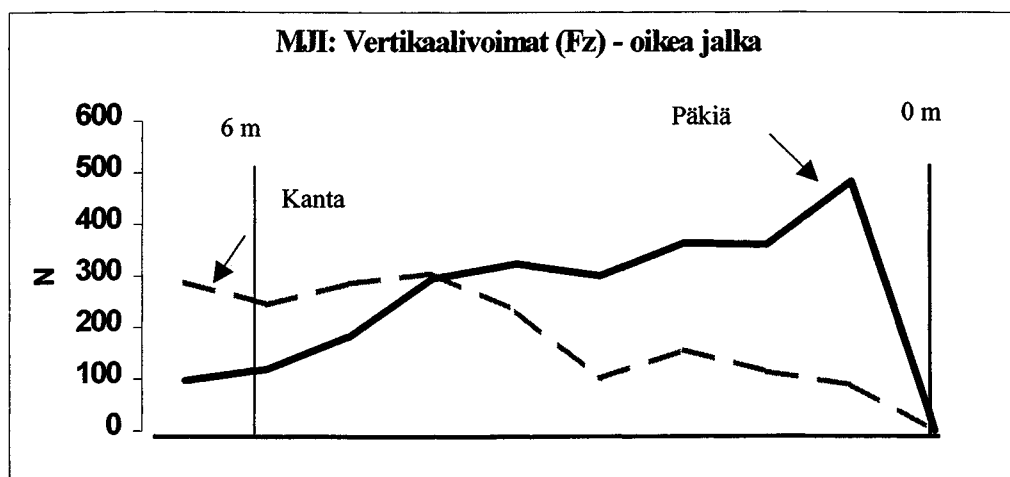
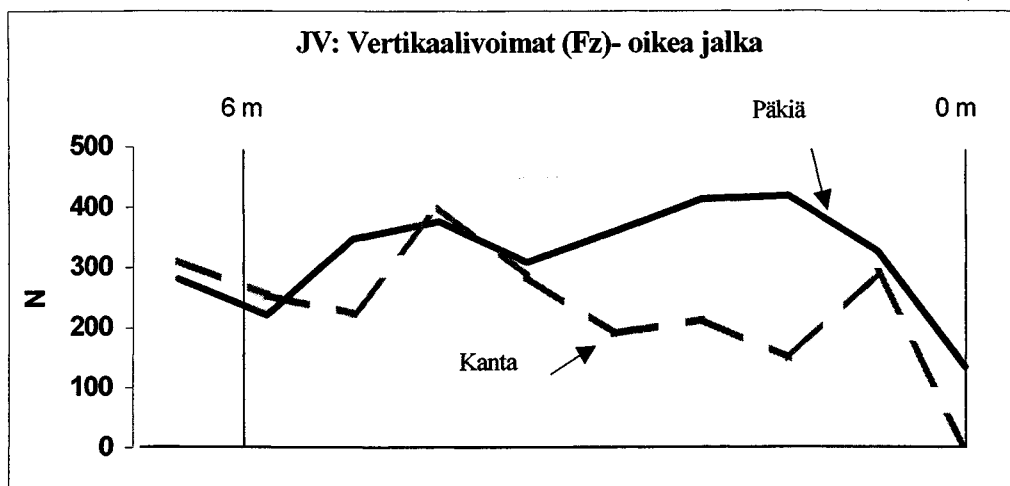
## 4 TUTKIMUSTULOKSET

### 4.1 Voimien jakautuminen päkiän ja kannan kesken

#### 4.1.1 Vertikaalivoimat (Fz)

Hyppyripöytää vasten kohtisuoraan vaikuttavissa voimissa molemmilla koehenkilöillä havaittiin ponnistuksen kevennysvaihe kaartein päättymisen kohdalla. Tämä kevennysvaihe on seurausta keskipakovoiman hellittämisestä hyppyrinpöydälle tultaessa. Samanlaisesta kevennysvaiheesta raportoi Virnavirta & Komi (1993). Ponnistuksen liikesarja on molemmilla hyppääjillä samantyyppinen, i. liikkeen alussa voimaa tuotetaan kantapäivoittoisesti ja irtoamishetkeä kohden voimantuotto siirtyy päkiälle. Selkein ero hyppääjien välillä oli ponnistuksen loppuvaiheessa, koehenkilö JV (kuva 3) käytti enemmän koko jalkapohjaa ponnistuksessa kuin koehenkilö MJJ, jonka ponnistus ”pyörii” enemmän kantapäältä päkiälle. Toisaalta tarkasteltaessa lantiokulman aukeamista, hyppääjä MJJ pystyy pitämään ylävartalon paremmin alhaalla kuin JV (irtoamiskulmat 117° vs. 126°) ja hänen lantiokulman muutoksensa ponnistuksessa on niinkään pienempi ( 75° vs. 90°, ks. taulukko 1. s. 22 )

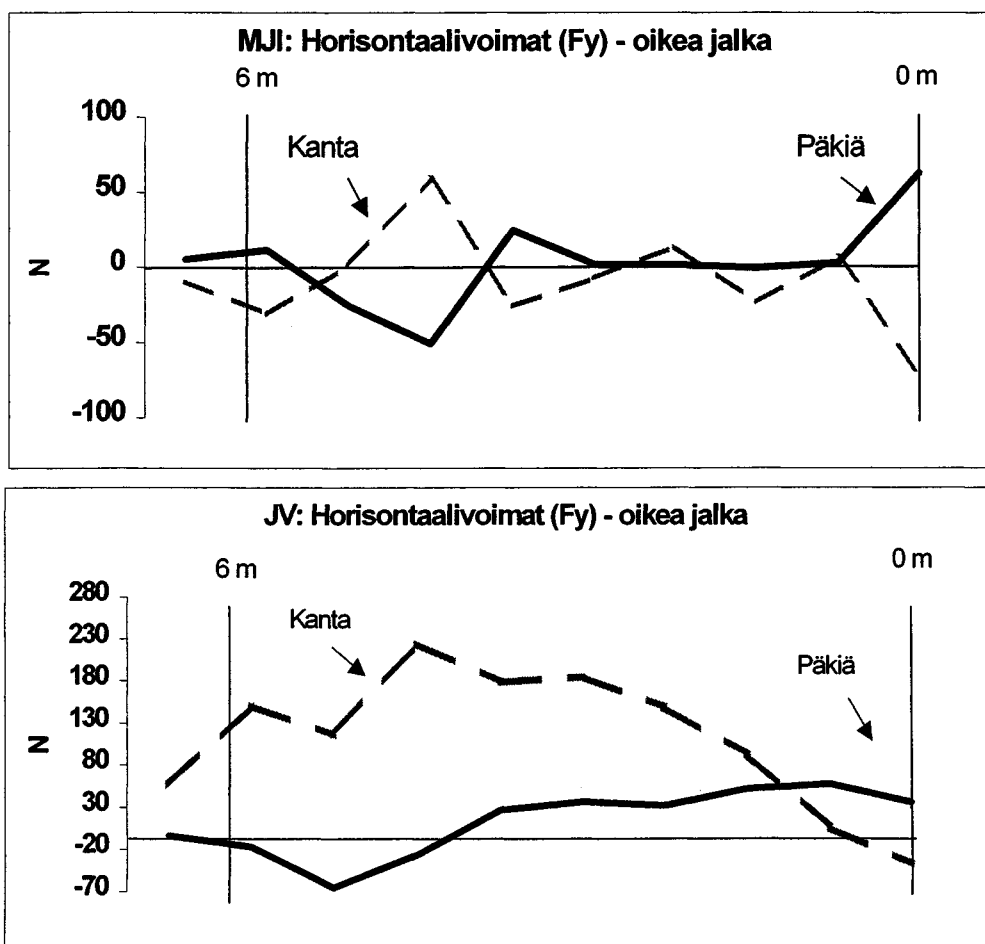




Kuva 3. Oikean jalan vertikaalivoimien jakautuminen , päkiä - kanta. Hyppääjä JV (yllä), MJI (keskellä) sekä hyppääjän mekaaninen malli ponnistuksessa (alla).

#### 4.1.2 Horisontaalivoimat (Fy)

Päkiän ja kannan horisontaaliset (hyppyripöydän suuntaiset) voimat käyttäytyivät samalla tavalla kuin vertikaalivoimatkin. Ponnistuksen alussa (6-4 m) suurimmat horisontaaliset voimat tuotetaan kannan kautta ja irtoamiskohdan lähestyessä selkeästi päkiän avulla hyppääjän pyrkiessä edulliseen lentoasentoon. Kannan negatiiviset voima-arvot aivan ponnistuksen lopussa taasen selittyvät siteen ja mäkipengän kiinnitysjärjestelmästä, joka kannan noustessa aiheuttaa vääntömomentin kantakappaleeseen, mikä näkyy negatiivisena voimana. Hyppääjällä MJI voimien vaihteellisuus selittynee pitkälti juuri erityisen kireällä olevasta kiinnitysjärjestelmästä, jonka seurauksena horisontaaliset voimat jäävät olemattomiin (kuva 4).



Kuva 4. Horisontaalivoimat ponnistuksessa, hyppääjä MJI (yllä) ja hyppääjä JV (alla).

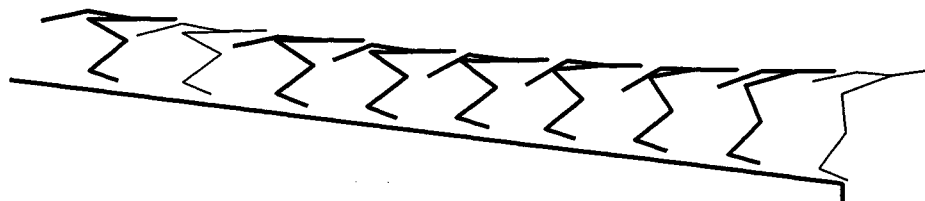
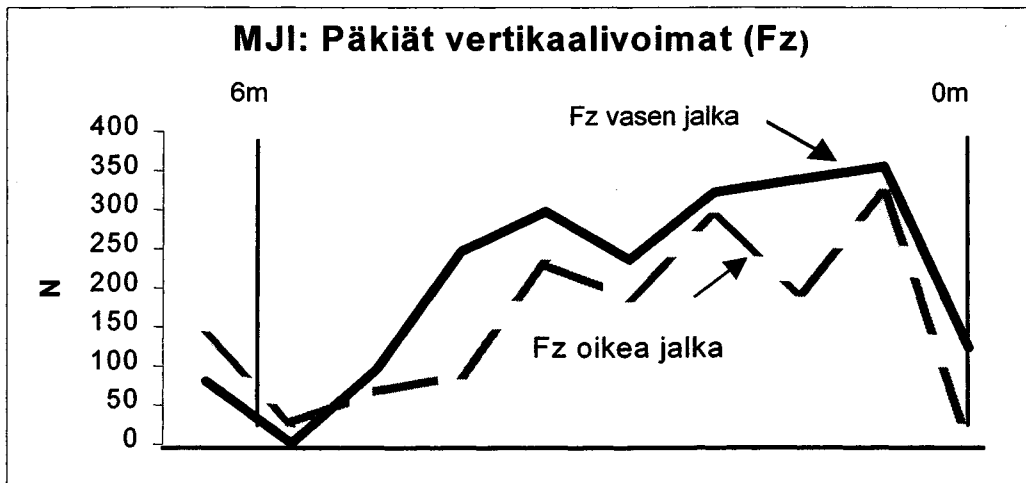
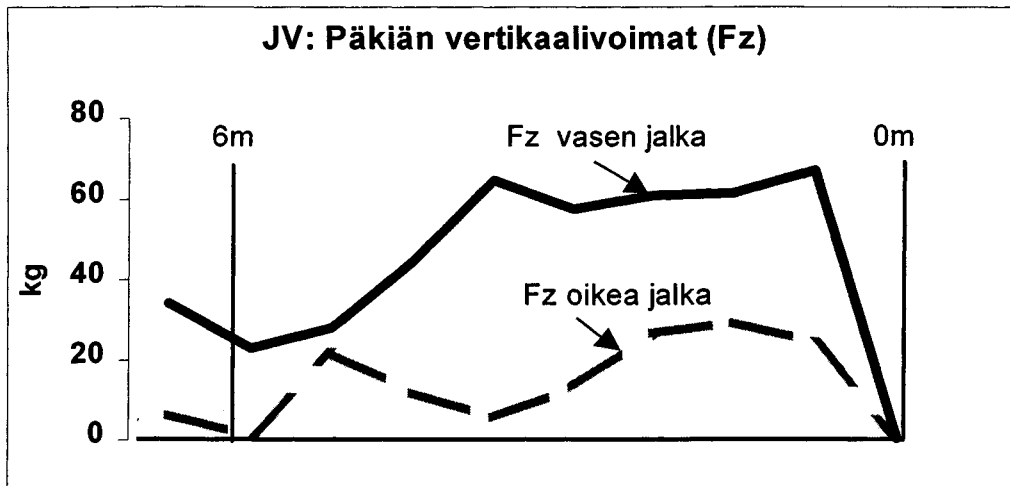
## 4.2 Päkiävoimien jakautuminen oikean ja vasemman jalan kesken

### 4.2.1 Vertikaalivoimat (Fz)

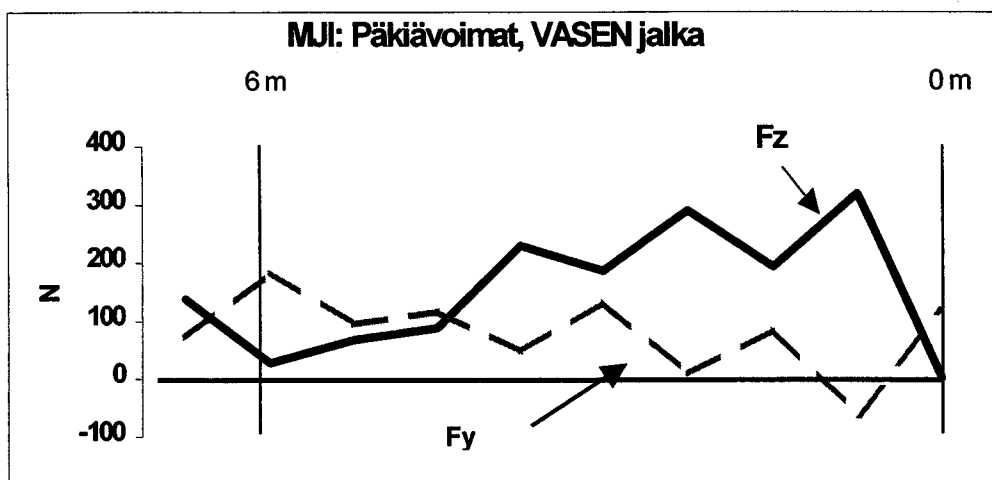
Asetelmassa 2 mitattiin molempien suksien siteiden etukappaleista päkiän tuottamia voimia. Kuvassa 5 on esitettyä molempien koehenkilöiden parhaat suoritukset. Edelleen ponnistuksissa on havaittavissa selkeä kevennysvaihe kaarteeseen päättyessä, sekä toinen kevennys 4 m ennen irtoamista. Merkillepantavaa koehenkilöllä, JV, on ponnistuksen toispuolisuus; kuormitus on selkeästi vasemman jalan päällä (65 % vs. 35 %, ks. kuva 5., s. 20). Koehenkilöllä MJI ponnistusliike parhaassa hypyssä tapahtui tasapuolisesti molemmilta jaloilta. Hyppääjän mekaanisessa mallisakin näkyvä käsiliike heijastuu pystyvoimien (Fz) kevennyksenä n. 3 m ennen irtoamista, osoittaen käsiliikkeen aikaansaaman venymis- lyhenemissykluksen, joka oikein ajoitettuna ja riittävän lyhenä suoritettuna tehostaa ponnistusta (Komi & Virmavirta, 1997).

### 4.2.2 Horisontaalivoimat (Fy)

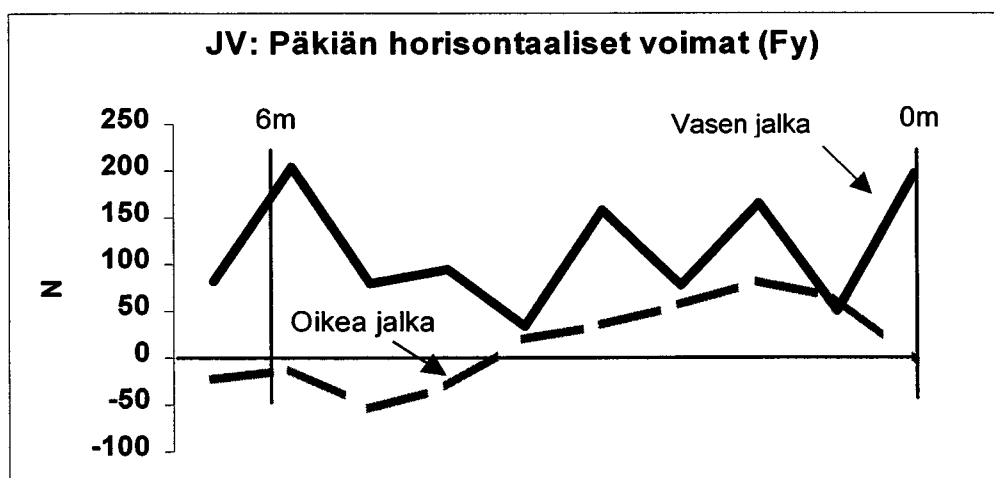
Vertikaali- ja horisontaalivoimien rytmitys päkiän alla hahmottuu selkeästi kuvassa 6. Vertikaalivoiman suurentuessa horisontaalivoima pienenee ja vastaavasti horisontaalivoiman kasvaessa vertikaalivoima vähenee. Koehenkilöllä MJI horisontaalivoimat (Fy) kasvoivat selvästi vasta ponnistuksen viimevaiheessa, kun taas JV:llä tämä hyppääjää eteenpäin kiihdyttävä voimakomponentti tapahtui pidemmällä matkalla (kuva 7.), mahdollistaen suuremman horisontaalisen irtoamisnopeuden hyppyriltä (taulukko 1., s. 22)



Kuva 5. Voimantuotot ponnistuksessa. Huomaa hyppääjän JV toispuolinen voimantuotto (yllä) verrattuna hyppääjän MJI molemmilta jaloilta suoritettuun, tasapainoiseen ponnistukseen (keskellä). Alla MJI:n mekaaninen malli ponnistuvaiheesta.



Kuva 6. Vertikaalisten ja horisontaalisten voimien rytmittyminen ponnistuksessa, hyppääjä MJI.



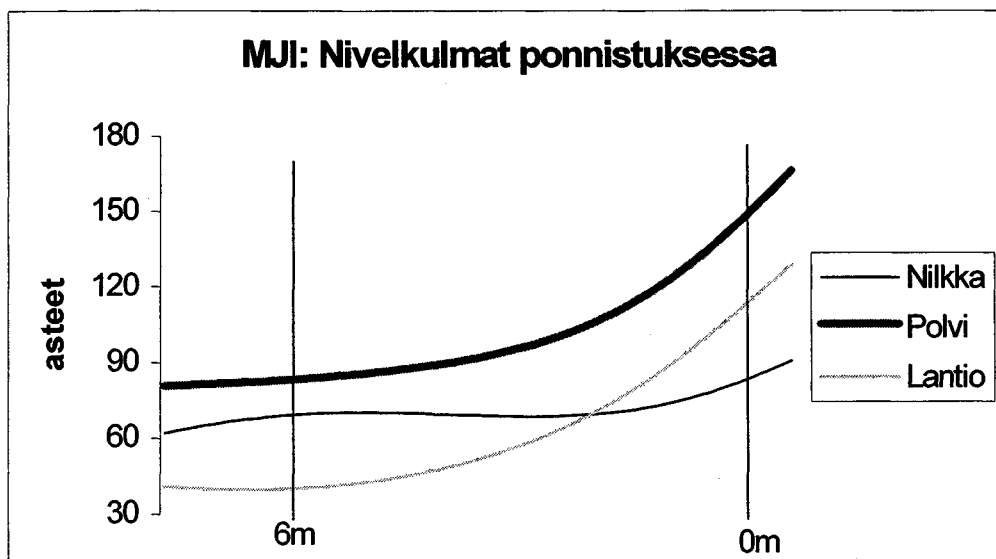
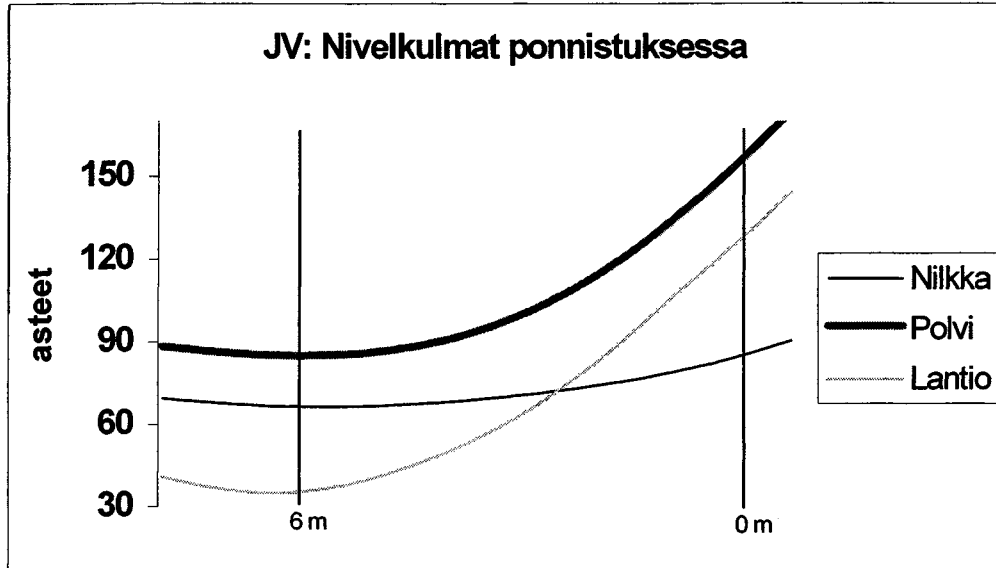
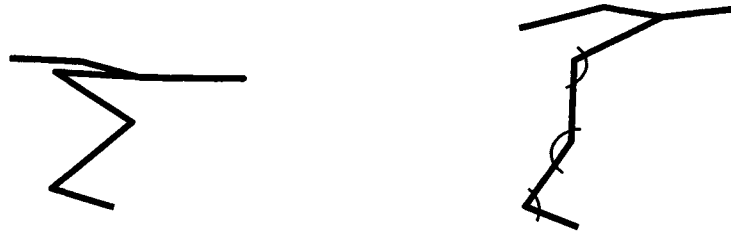
Kuva 7. Horisontaalisten voimien käyttäytyminen ponnistuksessa, hyppääjä JV.

### 4.3 Liikeanalyysi suorituksista

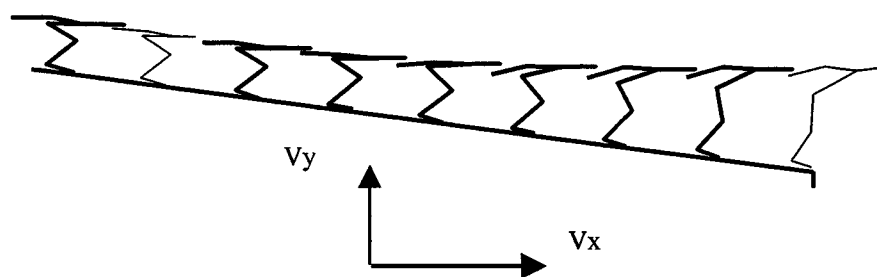
Vartalon eri segmenttien väliset kulmat, nivelten kulmamuutokset ja massakeskipisteiden nopeudet sekä nopeuksien muutokset on esitetty taulukossa 1 ja kuvissa 8-10. Molempien koehenkilöiden suoritustekniikka oli useiden vuosien harjoittelun myötä vakiintunutta, joten erot eri hyppyjen kesken olivat pieniä. Suoritusteknisinä eroina olivat hyppääjän MJI pienempi vartalon aukeamiskulma hyppyriltä lähdettäessä ja käsiliikkeen käyttö ponnistuksessa.

Taulukko 1. Kinemaattiset parametrit hyppääjien välillä

	JV		MJI	
	Keskiarvo	hajonta	Keskiarvo	hajonta
Horizontaalinen lähestymisnopeus hyppyripöydälle (m/s)	21,47	± 0,11	21,44	± 0,15
Horizontaalinen irtoamisnopeus hyppyriltä (m/s)	22,53	± 0,28	22,08	± 0,84
Maksimaalinen vertikaalinen nopeus (m/s)	-1,03	± 0,09	-1,20	± 0,10
Polvikulma lähestymisvaiheessa (°)	83	± 4	81	± 1
Polvikulma, irtoamisvaiheessa (°)	153	± 4	151	± 5
Lantiokulma, lähestymisvaihe (°)	36	± 3	42	± 2
Lantiokulma, irtoamisvaihe (°)	126	± 5	117	± 4
Nilkkakulma, lähestymisvaihe (°)	71	± 4	66	± 2
Nilkkakulma, irtoamisvaihe (°)	87	± 6	84	± 3

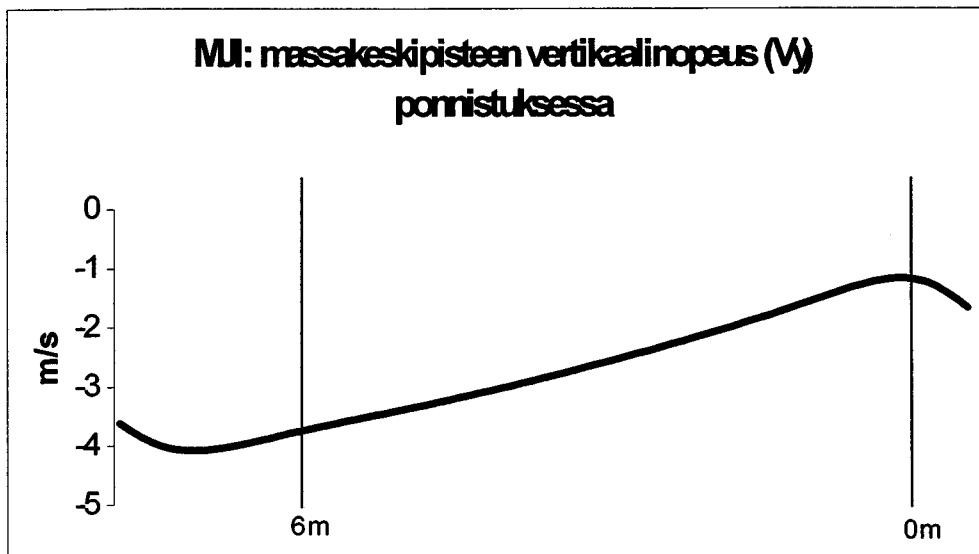
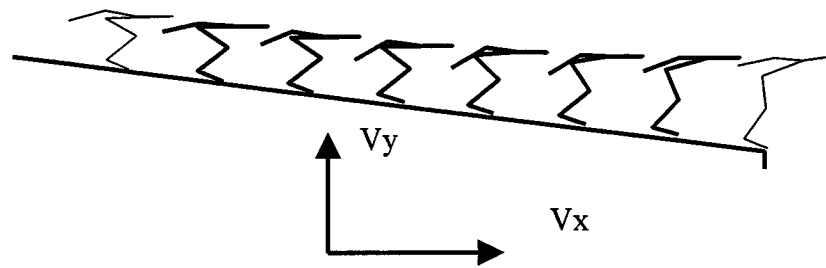


Kuvat 8. Hyppääjän mekaaninen malli ja mitatut kulmat (yllä), nivelkulmien keskiarvot ponnistuksessa hyppyistä 2-15, koehenkilö JV(keskellä) ja MJI (alla).



Kuva 9. Hyppääjän (JV) mekaaninen malli (yllä), vertikaalinen massakeskipisteen nopeus (keskellä) ja nopeuksien muutos hyppyrinpöydällä (alla).





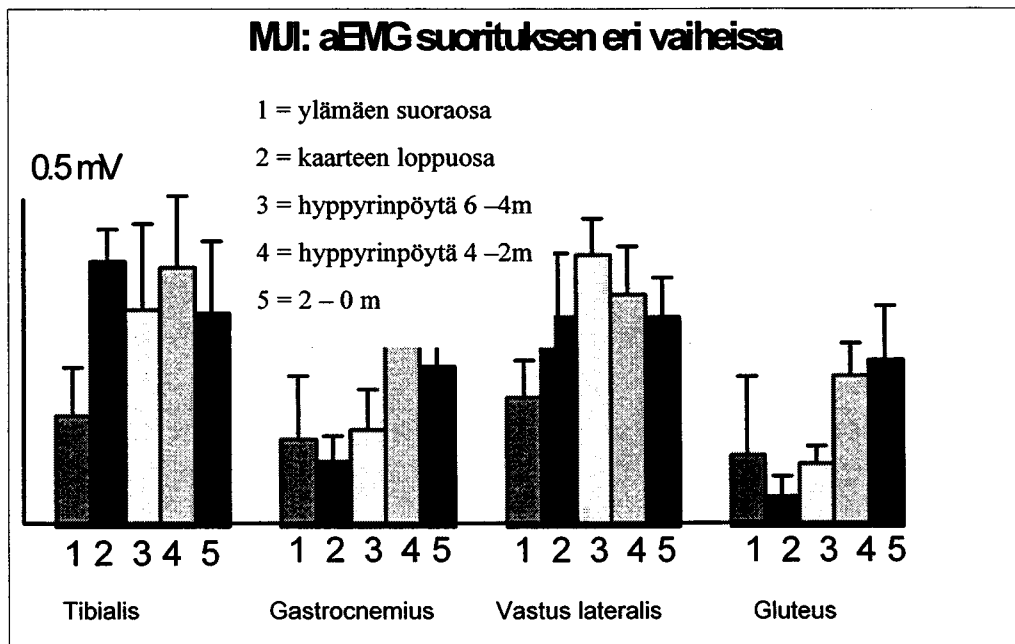
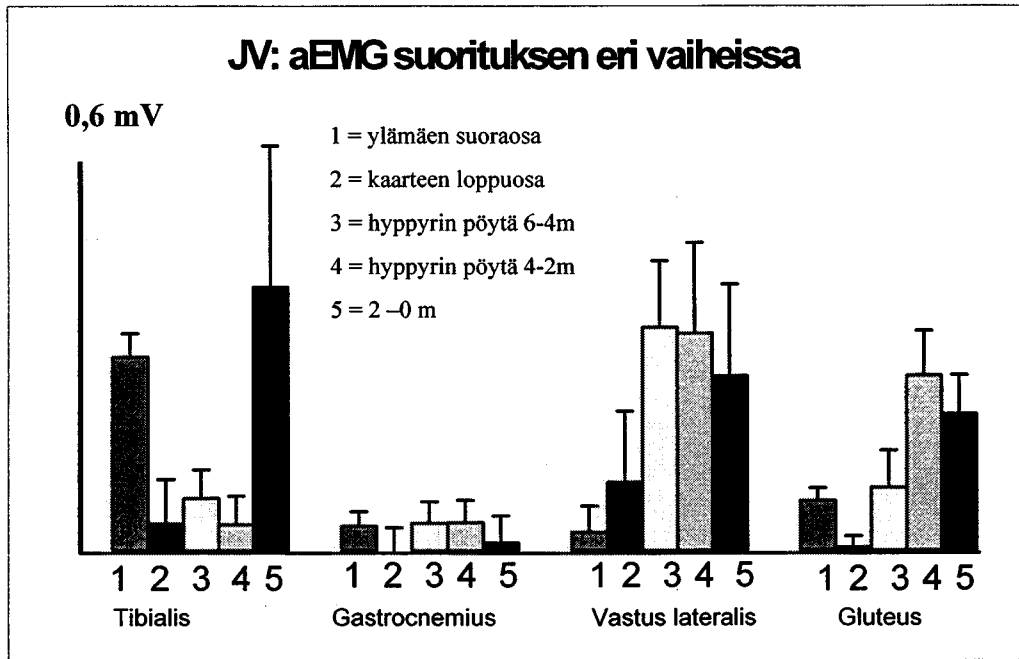
Kuva 10. Hyppääjän (MJI) mekaaninen malli (yllä), vertikaalinen massakeskipisteen nopeus (keskellä) ja nopeuksien muutos hyppyrinpydällä (alla).

#### 4.4 Lihasaktiivisuudet

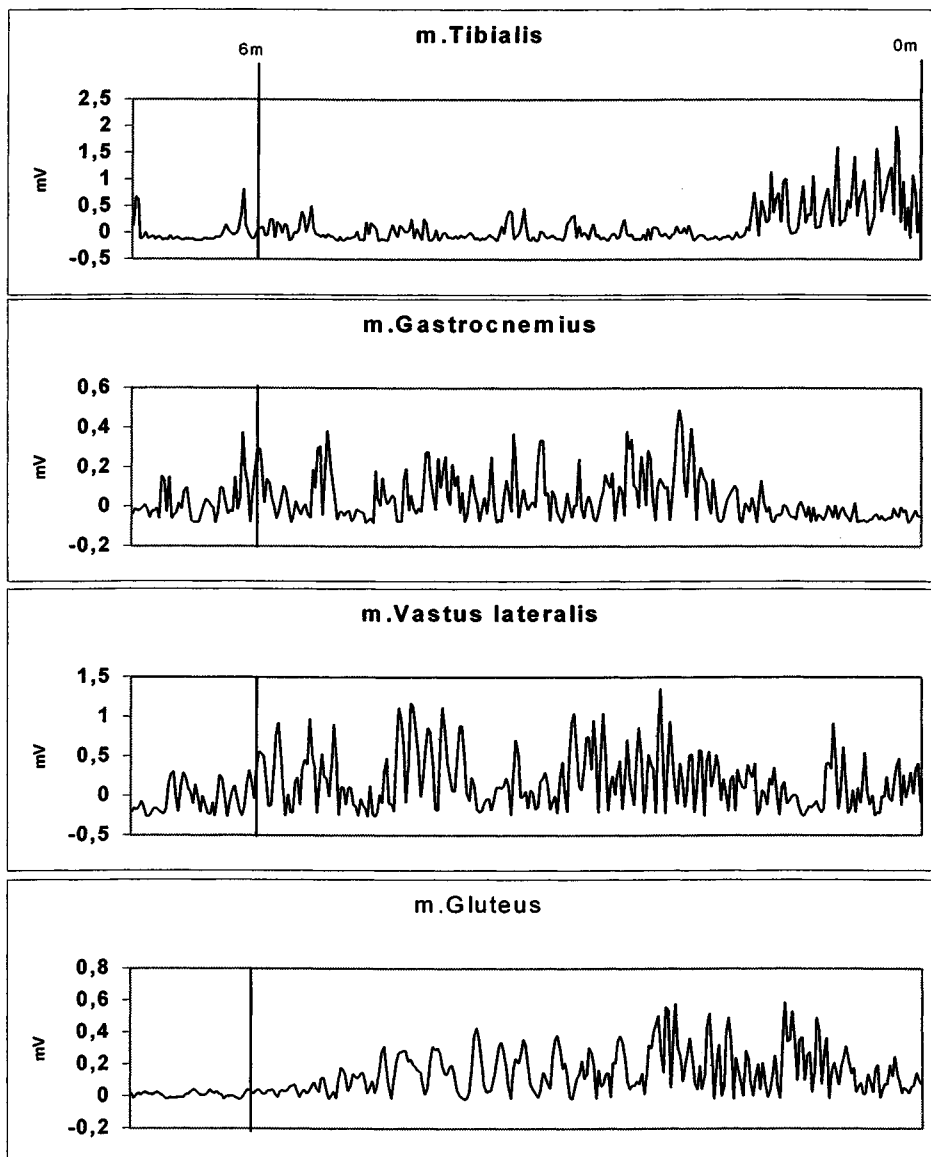
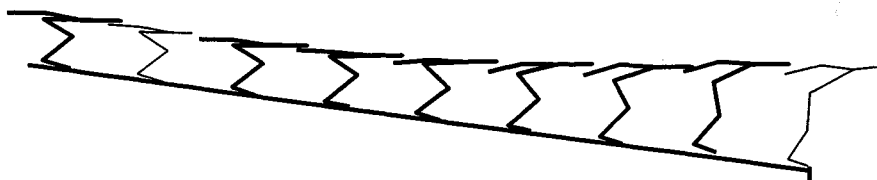
M. Tibialiksen ja m. Gastrocnemiuksen tehtävänä ylämäen suoralla osalla ja hyppyri-pöydän kaarteella on pitää laskuasento vakaana ja estää kehon massakeskipisteen liikkuminen eteen-taakse -suunnassa. Ponnistusvaiheessa tämä agonisti-antagonisti lihaspari toimii siten, että m. Gastrocnemius pyrkii tehostamaan ponnistuksen loppu-vaihetta, kun taas m. Tibialis avustaa suksen nostamisessa hyppyriltä lähdettäessä.

Nelipäinen polven ojentajalihaksisto (m. Vastus lateralis, m. Vastus medialis, m. Rectus femoris, m. Intermedius) on taasen koko ponnistustapahtuman tärkein lihaksisto, jonka lisäksi sen tehtävänä on vastustaa keskipakovoiman (suuruus n. 60 % hyppääjän massasta) puristavaa vaikutusta ylämäen kaarteella. M. Gluteus toimii lantion ojentaja-na ja aktivoituu ylävartalon auetessa ponnistuksen loppuvaiheessa. (Virmavirta & Komi, 1991)

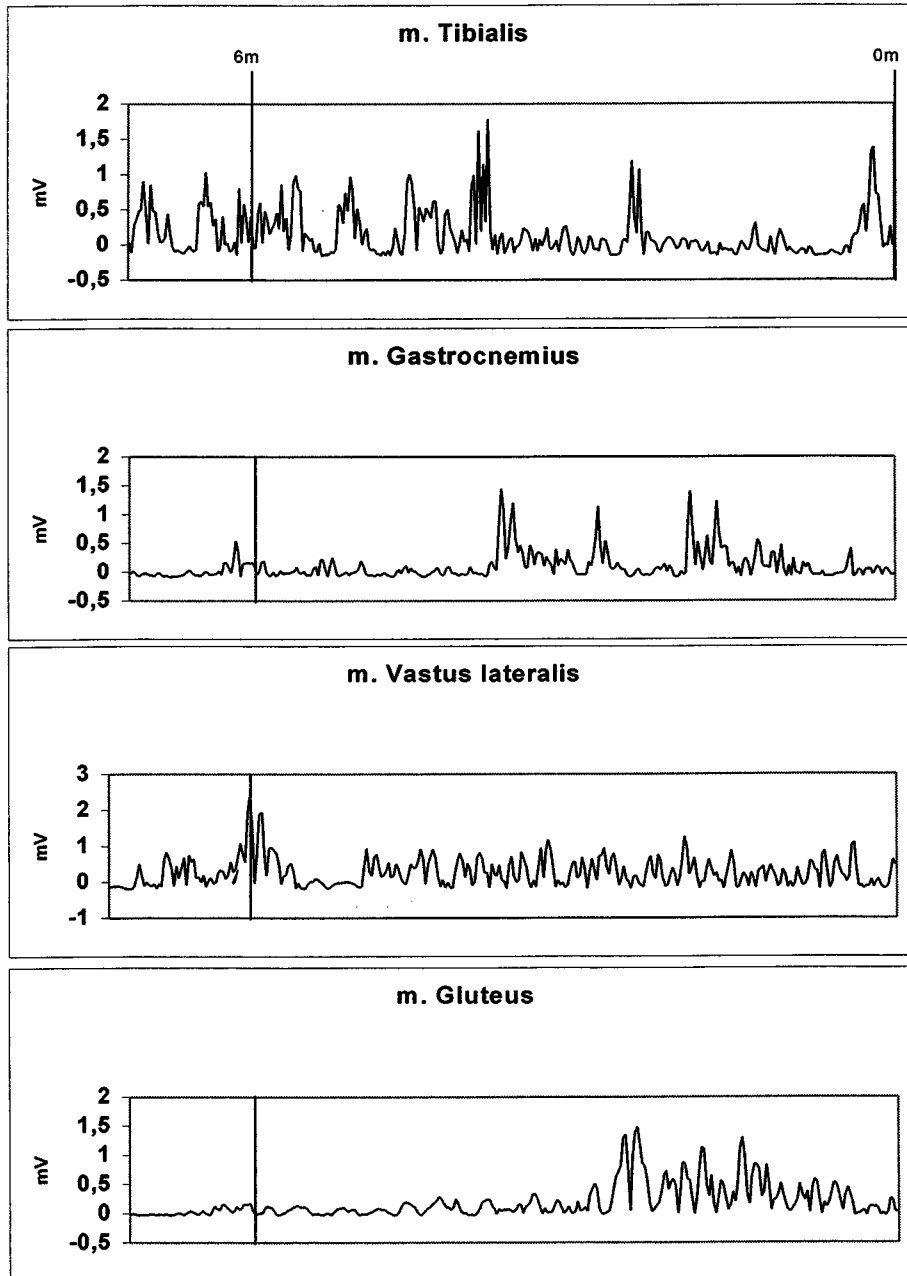
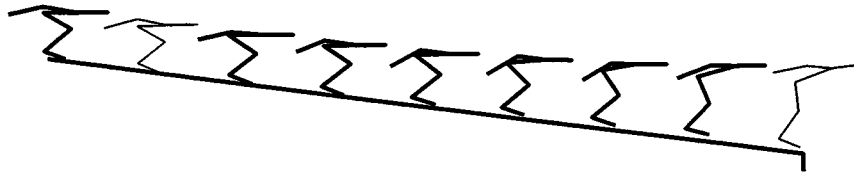
Eri lihasten aktivoitumisjärjestys näkyy kuvassa 11, joissa on kuvattuna koehenkilöiden keskimääräiset lihasaktiivisuudet suorituksen eri vaiheissa. Kuvissa 12 ja 13 on esitet-tynä molempien hyppääjien EMG aktiivisuudet ponnistuksen aikana heidän parhaasta hypystä. Huomionarvoista hyppääjän JV (kuva 12) suorituksessa on m. Tibialiksen aikainen aktivoituminen ennen hyppyriltä irtoamista. Hyppääjällä MJI (kuva 13) taasen merkillepantavaa on m. Vastus lateraloksen vaatimaton aktiivisuus ponnistuksen aikana.



Kuva 11. Keskimääriset lihasaktiivisuudet ja niiden hajonnat tärkeimmistä ponnistuslihaksista suorituksen eri vaiheissa. Suoritukset 2-15. Koehenkilö JV (yläkuva) ja MJI (alakuva).



Kuva 12. Hyppääjän (JV) paras suoritus, lihasaktiivisuudet ponnistuksessa.



Kuva 13. Hyppääjä MJI, lihasaktiivisuudet parhaasta hypystä.

## 5 POHDINTA

Mäkihypyn ponnistusvoimien mittauksissa on suurimmaksi osaksi käytetty hyppyrin-pöydällä olevia voimalevyjä, joiden avulla on saatu käsitystä ponnistustapahtumasta ja siinä käytettävistä vertikaalisista, hyppyripöytään kohtisuoraan vaikuttavista voimista ja niiden ajoituksista. Kuitenkaan hyppyripöydän suuntaisia, horisontaalisia voimia, tutkimustuloksissa ei ole raportoitu. Yrityksiä näiden voimien mittaamiseksi on tehty (Vir-mavirta & Komi, 1993), mutta mittausjärjestelmien kalibrointivaikkeudet ovat estäneet tulosten tulkinnat. Viime vuosina mäkihypyn tutkimukseen uuden lisäaspektin on tuo-nut erilaisten painepohjallisten käyttö. Tämän menetelmän avulla on mahdollistunut jalkapohjien paineiden vaihteluiden mittaaminen koko suorituksen ajalta. Jyväskylän Liikuntabiologian laitoksella valmistettiin jo 1990-luvun puolivälissä erilliset mäkihyp-pysiteet, jotka antoivat valmiudet niin vertikaalisten kuin horisontaalisten voimien mit-taamiseen; erikseen siteen päkiä- ja kantaosasta ja vielä erikseen molemmista suksista. Siteillä ei kuitenkaan tehty ainuttakaan tutkimusta, koska voimasignaalien vahvistami- seksi tarvittava vahvistin oli liian raskastekoinen hyppääjän selässään kuljetettavaksi. Kun talvella 2000 siteisiin valmistui käytännön mittaustilanteen mahdollistava, pieni-kokoinen ja riittävän kevyt (350 g), maksimissaan neljä eri voimakanavaa käyttävä vahvistin, siteiden käyttö tutkimustarkoitukseen tuli ajankohtaiseksi.

Tämän tutkimuksen perimmäisenä tarkoituksena oli mäkihypyn ponnistuksen tutkimi-nen siteissä olevien voima-antureiden avulla. Ajatuksena oli selvittää, minkä suuruisia vertikaali- ja horisontaalivoimia ponnistustilanteessa ilmenee ja miten nämä voimat käyttäytyvät. Lisäksi videokuvapohjaista liikeanalyysiä ja lihasaktiivisuusmittauksia käytettiin kuvaamaan eri hyppääjien käyttämiä ponnistustekniikoita. Koska kyseessä oli näiden mittalaitteiden pilottitutkimus ja sillä pyrittiin selvittämään enemmänkin käyte-tytyn menetelmän ilmiön mittauskäytettä, koehenkilöinä toimi ainoastaan kaksi kansallisen tason hyppääjää ( molemmat 20 parhaan suomalaisen mäkimiehen joukossa kaudella 1999-2000). Tutkimus toteutettiin Laajavuoren K65 m mäessä kahdella eri asetelmalla, joissa ensimmäisessä tutkittiin päkiän ja kannan kautta alustaan kohdistuneita voimia. Toisessa asetelmassa haluttiin selvittää hyppääjän ponnistuksen symmetrisyyttä ala-

raajojen kesken. Tällöin käytössä olleet neljä kanavaa käsittivät molempiin päkiöihin kohdistuneet vertikaali- ja horisontaalivoimat.

Tuloksissa tuotettujen nettovoimien vertailutasona käytettiin hyppääjään ylämäen suoralla osalla kohdistuneita voimia, ottaen vertailuarvoksi kullekin voimakomponentille ( $F_z$ ,  $F_y$ ) niiden keskiarvon 200 ms ajanjaksolta. Vertikaalivoimien 0-tasot korjattiin positiivisiksi lopullisiin tuloksiin, mutta horisontaaliset voimat säilyttivät alkuperäiset arvonsa, jolloin negatiivinen arvo merkitsi jarruttavaa liikesuuntaa (kuva 1). Saadut tulokset osoittivat, että mäkihypyn ponnistus ei välttämättä olekaan aivan niin symmetrinen kuin on kuviteltu, varsinkin koehenkilön JV ponnistus tapahtui selkeästi toispuolisesti. Näiden asetelmien perusteella ponnistuksen totaalivoimia ei kuitenkaan pystytä määrittelemään; ensimmäisessä asetelmassa mittaukset tapahtuivat pelkästään toisen jalan osalta ja jälkimmäisessä asetelmassa pelkästään päkiöistä. Totaalivoimien laskemiseksi käytössä pitäisi olla kaikkiaan kahdeksan kanavaa, mikä nykytekniikalla tekisi voimahvistimen liian painavaksi hyppääjän mukanaan kannettavaksi.

Ponnistustekniikoita vertailtaessa hyppääjälle MJI tyypillinen pieni käsiliike ponnistuksessa selittänee massakeskipisteen vertikaalinopeuden käyrän mallin. Huolimatta siitä, että nivelkulmakäyrässä ei näy mitään ”notkahdusta”, tämä notkahdus näkyy vertikaalinopeuden käyrässä (kuva 10). Sen sijaan hyppääjällä JV lantiokulman pieneneminen kaarteella heijastuu myös massakeskipisteen vertikaalinopeuteen (kuvat 9). Voimantuo-  
toltaan hyppääjän MJI käyttämä tekniikka on hyökkäävämpi kuin hyppääjä JV:n. MJI:n ponnistus pyörii kannalta päkiälle ja viime vaiheessa kiihtyy voimakkaasti eteenpäin, mikä näkyy jyrkkänä, mutta lyhyenä nousuna päkiöiden horisontaalisissa voimissa. Myös liikeanalyysi tukee tätä käsitystä, lantiokulman muutos on pienempää ja irtoamishetkellä ylävartalo pysyy alempana kuin JV:llä.

Ponnistuksen symmetrisyyden arvioinnissa käytetty menetelmä osoittautui käyttökelpoiseksi. Tasapainoista ja aerodynaamista, matalaa laskuasentoa pidetään valmentajien keskuudessa yhtenä hyvän ponnistuksen perusedellytyksistä. Koehenkilön JV ponnistus osoittautui kuitenkin selkeästi toispuoleiseksi. Tämä ei ainoastaan vähennä ponnistustehoa, mutta vaikuttaa myös suksen ja ladun välisen kitkan lisääntymiseen, joka taas varsinkin vetisellä kelillä heikentää hyppyrille lähestymisnopeutta (edellyttäen, että

laskuasento on toispuolinen). Toispuolinen ponnistus voi olla seurausta monesta tekijästä, esimerkiksi horjahtamisesta ponnistustilanteessa tai tulosten arviointivirheestä. Virhearviointi voisi syntyä, jos voimatasojen vertailukohdalla olevalla ylämäen suoralla osalla olisi joku epätasainen kohta toisella ladulla. Nämä molemmat epäkohdat pystyttiin eliminoimaan; vertailukohta kuhunkin hyppyyn määritettiin erikseen sekä voimakäyrien, että lihasaktiivisuuksien perusteella. Toisaalta hyppääjällä JV oli samanlainen trendi kaikissa hypyissä, eikä hän myöskään raportoinut mitään mäen kuntoon viittaavaa syytä, esimerkiksi hyppyripöydän epätasaisuutta. Yksi lähestymistapa toispuoliseen ponnistukseen voisi olla jalkaterän rakenteellinen tai vamman aiheuttama virheasento, minkä korjaaminen voisi onnistua erillisillä pohjallisortoosilla. Pohjallisortoosien käytöstä jalkaterän asennon korjaamisessa ja tasapainon parantamisessa raportoivat mm. Combs-Orteza ym. (1992).

JV:n hyppytekniikalle on mittausten mukaan tyypillistä ponnistusvoiman tuottaminen tasaisesti kannan ja päkiän avulla. Horisontaalisten voimien tuottaminen koko ponnistukseen käytetyn ajan aikana kertoo taasen hyvästä, eteen-taakse -suunnassa tasapainoisesta laskuasennosta. Samalla se mahdollistaa JV:lle suuremman horisontaalisen nopeuden lisäyksen ponnistuksessa kuin mihin hyppääjä MJI kykenee (taulukko 1, s. 22). Toisaalta mäkiengän ja siteen kantakappaleen yhdistävä kiinnitysjärjestelmä saattaa aiheuttaa sen, että päkiän ja kannan tuottamat horisontaaliset voimat kompensoivat toisensa (ks. kuva 4, s. 18), eikä positiivista vaakavoimakomponenttia pääse syntymään. Tämä teoria edellyttää, että ko. kiinnitysnavu on lyhyt, eikä mahdollista juurikaan mäkiengän kannan nousemista siteen kantakappaleesta.

Parempaan ponnistustekniikkaan pyrittäessä kannattaisi tulosten valossa näiden kahden hyppääjän pyrkiä päkiä-kanta voimantuottomalliltaan hyppääjän JV ”koko jalan” ponnistukseen, i. käyttämään koko jalkapohjaa tukipisteenä ja hyppääjän MJI eri jalkojen kesken vallitsevaan symmetrisyyteen, irtoamisvaiheen aerodynaamisempaan asentoon (= pienempi lantiokulma) sekä ponnistusta tehostavaan pieneen käsiliikkeeseen. Vertaillessaan maailman ehkä kaikkien aikojen parhaan mäkihyppääjän (Matti Nykänen) ponnistusta muihin suomalaishyppääjiin (Virmavirta ja Komi (1994)), tutkijat totesivat, että hänen ylivoimaisuutensa perustana oli koko ponnistuksen ajan hyppyriä kohden kiihtyvä liike. Säilyttämällä säärikulmansa muita paremmin muuttumattomana



ponnistuksessa, Nykänen pystyi yhdistämään vertikaalisen liikkeen horisontaaliseen ja saavuttamaan muita paremman horisontaalisen nopeuden.

Voimasignaaleita analysoitaessa huomion arvoista oli koko ylämäen laskun aikainen, voimiin heijastunut värinä. Tämän suuresta nopeudesta, ladun epätasaisuudesta ja suksien rakenteesta johtuvan värinän suodattaminen esimerkiksi suksiin kiinnitetyn kiihtyvyyssanturin avulla tarkentaisi vielä tulosten analysointia. Samoin painepohjalisten käyttö yhdessä sideanturoiden kanssa olisi antanut mahdollisuuden arvioida kaikkia ponnistuksen aikaisia voimia ja tarkentaa laskuasennon toispuolisuutta koskevia mittauksia. Yksi mysteeri, mikä jäi epäonnistuneen kalibroinnin takia selvittämättä, on keskipakovoiman vaikutus horisontaalisiin voimiin elottomalla kappaleella. Mittausjärjestelmien kehittäminen horisontaalisten voimien ja symmetrisyyden esiin saamiseksi niin laboratorio- kuin mäkiolosuhteissakin laajentaisi mäkihypyn ponnistuksen tietämystä ja mahdollistaisi vielä tarkemman henkilökohtaisen palautteen annon urheilijalle.

## Lähdeluettelo

- Combs-Orteza, L. , Vogelbach, D.W. & Denegar, C.R. (1992) The effect of molded and unmolded orthotics on balance and pain while jogging following inversion ankle sprain. *The Journal of Athletic Training*, 27 , s. 80-84.
- Demster, WT. , Gaughran G.R.L (1967) Properties of body segments based on size and weight. *American Journal of Anatomy*, 120: s. 33-54.
- Hochmuth, G. (1958) Untersuchung über den Einfluss der Absprungbewegung auf die Sprungweite beim Skisprung. *Wissenschaftliche Zeitschrift der DHFK*, s. 29-59. Leipzig.
- Komi, P.V. , Virmavirta, M. (1997) Ski-Jumping take-off performance : Determining factors and methodological advances. *Science and Skiing* (toim. E. Müller ym.) s. 3-26. Chapman & Hall, Cambridge University Press, Cambridge.
- Nigg, B.M. , Herzog, W. (1999) *Biomechanics of the Musculo-skeletal System*, 2nd ed. John Wiley & Sons Lt Sons Ltd. West Sussex, England.
- Schwameder, H. , Müller, E. (1995) Biomechanische Beschreibung und Analyse der V-Technik im Skispringen, *Spectrum der Sportwissenschaften*, 7 (1): s. 5-36.
- Sobotka, R. , Kastner, J. (1977) Registrierung des Kraftimpulses beim Skiabsprung. In. *Zur Biomechanik des Skilaufs* (toim. F.Fetz), s. 90-99. Innsbruck.
- Troxler, G., Rùegg, P. (1979) Kraftmessung auf dem Schanzentisch. *Semesterarbeit in Elektrotechnik an der ETH*, Zürich.

- Tveit, P. , Pedersen P.O. (1981) Forces in the take-off in ski-jumping. *Biomechanics VII -B (toim. A. Morecki ym.)*, s. 472-477. Baltimore: University Park Press.
- Vaverka, F. (1987) *Biomechanics in ski jumping*. University of Olomouc
- Virmavirta, M. , Komi, P.V. (1989) The takeoff forces in ski jumping. *International Journal of Sport Biomechanics*, 5: s. 248-257.
- Virmavirta, M. , Komi, P.V. (1991) Electromyographic analysis of muscle activation during ski jumping performance. *International Journal of Sport Biomechanics*, 7: s. 175-182.
- Virmavirta, M. , Komi, P.V. (1993) Measurement of take-off forces in ski jumping Part I. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 3: s. 229-236.
- Virmavirta, M. , Komi, P.V. (1994) Takeoff analysis of a champion ski-jumper. *Coaching and Sport Science Journal*, 1: 1: s. 23-27.
- Virmavirta, M. , Komi, P.V. (2000) Plantar pressure during ski-jumping take-off. *Journal of Applied Biomechanics*, 16: s. 320-326.
- Virmavirta, M. , Perttunen, J. , Komi, P.V. EMG activities and plantar pressure during ski jumping take-off in three different size hills. *Journal of Applied Electromyography and Kinesiology (painossa)*.

**Kuvaliite**

Koehenkilö JV "työssään", Laajavuori K65 -mäki